

Research Article

Efectos económicos de la estrategia de cosechas múltiples en el cultivo del ostión del norte *Argopecten purpuratus*: una oportunidad para mejorar la competitividad

Eduardo P. Pérez^{1,2}

¹Departamento de Biología, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte
P.O. Box 117, Coquimbo, Chile

²Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), P.O. Box 599, La Serena, Chile

RESUMEN. Una situación recurrente en el mercado de muchas especies bajo cultivo acuícola es la tendencia en la disminución del precio internacional en oposición al aumento en los costos de los insumos, lo que obliga a la industria a ser innovadora al momento de rentabilizar la inversión. Una opción poco explorada es el aumento del valor de la producción a través de una cuidadosa selección de tamaños y tiempos de cosechas. Las cosechas parciales permiten que calibres subóptimos puedan tener el tiempo necesario de crecimiento hasta alcanzar mejores atributos, al mismo tiempo que la fracción de mejor crecimiento es cosechada y puesta disponible en el mercado. Difiere significativamente de la estrategia alternativa de cosechas totales, donde la totalidad de la producción es cosechada al mismo tiempo. Así, el óptimo económico será resultado del tiempo de primera cosecha (DPC), de la longitud de cosecha (LC), número de cosechas (NC) e intervalo de tiempo (Δt) entre cosechas sucesivas. Mediante un modelo de simulación, alimentado con valores reales de una empresa de cultivo de ostión del norte (*Argopecten purpuratus*) se analizó el resultado económico de la estrategia de cosechas múltiples. Los resultados indican que las combinaciones alternativas de DPC, LC, Δt y NC generan distintos niveles de rendimientos económicos, aspecto que debiera ser considerado por los productores. En los escenarios simulados de cosechas, una decisión incorrecta en este sentido podría generar una diferencia del orden de US\$ 510.000.

Palabras clave: *Argopecten purpuratus*, ostión del norte, cosechas múltiples, rendimiento económico, acuicultura.

Economic effects of the multiple harvests strategy in the culture of northern scallop *Argopecten purpuratus*: an opportunity to improve competitiveness

ABSTRACT. A recurrent situation in the market of many species under culture is the trend in the decline in the international price in opposition to the increase in the costs of inputs, forcing the industry to be innovative at the time of return on the investment. A little explored option is the increase in the value of production through a careful selection of sizes and timing of harvest. Partial harvests allow sub optimal calibers to have the necessary time to grow until reaching best attributes, at the same time that the fraction of better growth is harvested and put available on the market. It differs significantly from the alternative strategy of total harvest, where the entire production is harvested at the same time. Thus, the economic optimum is the result of first harvest time (DPC), the length at harvest (LC), number of harvests (NC) and time interval between successive harvests (Δt). The economic result of the strategy of multiple crops using a simulation model, powered by actual values of a culture firm of northern scallop (*Argopecten purpuratus*) was analyzed. Results indicate that the alternative combinations of DPC, LC, Δt and CN generate different levels of economic returns, aspect that should be considered by the producers. In simulated crop scenarios, a wrong decision could generate a difference in the order of US \$510 thousand.

Keywords: *Argopecten purpuratus*, scallop, multiple crops, economic performance, aquaculture.

INTRODUCCIÓN

Una situación recurrente en el mercado de muchas especies en cultivo acuícola es la tendencia a la disminución del precio internacional en oposición al aumento en los costos de los insumos (principalmente energía y alimento), lo que obliga a la industria a ser innovadora al momento de rentabilizar la inversión. Una opción es la incorporación de nuevas tecnologías que hagan aun más intensivos los cultivos (*i.e.*, Araneda *et al.*, 2008), favoreciendo la relación beneficio-costos, aunque existe evidencia de que no siempre es posible esta mejora económica (De Ionno *et al.*, 2006). Esta alternativa tecnológica puede ser complementaria al aumento en el valor agregado de la producción. Una opción menos explorada es el aumento del valor de la producción a través de una cuidadosa selección de tamaños y tiempo de cosechas (*i.e.*, Wurts, 2004; Tian *et al.*, 2005; Yu & Leung, 2005, 2006; Yu *et al.*, 2006, 2007; Saiti *et al.*, 2007; Ngoc-Anh *et al.*, 2010). Esta estrategia, conocida como cosechas parciales, permite que calibres sub óptimos puedan tener el tiempo necesario de crecimiento hasta alcanzar mejores atributos, al mismo tiempo que la fracción de mejor crecimiento es cosechada y puesta disponible en el mercado. Difiere significativamente de la estrategia alternativa de cosechas totales, donde la totalidad de la producción es cosechada al mismo tiempo (Yu *et al.*, 2007), obteniéndose una gran dispersión de calibres con inclusión de aquellos de bajo valor de mercado.

Por otra parte, existen casos en que, por exigencias de mercado, el productor no puede decidir por alcanzar el óptimo económico general. Esto ocurre en situaciones donde el productor es un tomador de precios o se le pide un calibre en particular, por lo que de la variedad de calibres que se obtiene por variabilidad natural sólo la fracción de calidad solicitada posee valor de mercado. En esta situación, la mejor opción es la búsqueda de un óptimo local. Sin embargo, el elevado número de combinaciones de (i) tiempo de cosecha, (ii) intervalo de tiempo entre cosechas sucesivas, (iii) longitud de los individuos a cosechar y (iv) número de cosechas, impiden que se pueda hacer sin recurrir a un proceso de modelación. Los reportes de USMSFP (2006) y Gallardo (2010) indican que las cuatro variables anteriores son cruciales para determinar un óptimo general o local para el cultivo.

Si bien son escasos en la literatura acuícola, existen estudios comparativos sobre diferencias en el rendimiento de biomasa entre estrategias de cosechas parciales y totales. A modo de ejemplo, Brummett (2002) comparó los resultados en un cultivo de

tilapias, reportando que con la cosecha total se obtuvo un rendimiento de 639 ton ha⁻¹, en tanto que en los tratamientos con cosechas parciales el rendimiento observado estuvo entre 662 y 965 ton ha⁻¹. El mecanismo que opera en este aumento de la producción es que la tasa de crecimiento de la porción no cosechada mejora en la medida en que la densidad post-cosecha se reduce (Hannesson, 1989; Villalón, 1991; Lyashenko, 2001). En cultivos de camarones se ha observado el mismo patrón; de un rendimiento individual inicial de 17,9 g el rendimiento promedio aumentó a 34,2 g al cabo de 10 semanas (USMSFP, 2006). De igual forma, al comparar estrategias de cosecha alternativas (total, parcial y disminución gradual de la densidad) Yu & Leung (2006) encontraron que al realizar una cosecha única el rendimiento individual fue de 11,6 g, mientras que en un sistema de cosechas múltiples se podrían obtener rendimientos de hasta 20,6 g.

Como se ve, las cosechas parciales aumentan el rendimiento físico del cultivo, aunque esto no necesariamente implica un mejoramiento en el rendimiento financiero (De Ionno *et al.*, 2006), que es en última instancia el objetivo de un cultivo comercial. Hannesson (1989) mostró que en una remoción continua es posible maximizar el rendimiento económico. Sin embargo, USMSFP (2006) mostró que si bien la cosecha múltiple aumenta el rendimiento físico, la optimización económica no ocurre simultáneamente. En efecto, la cosecha de camarones en dos cosechas parciales maximizó el rendimiento de la biomasa con una distancia de 10 semanas entre la primera y segunda cosecha, pero desde un punto de vista económico el óptimo se habría encontrado con una diferencia de cuatro semanas entre ambas cosechas (USMSFP, 2006), un resultado similar fue reportado por Yu & Leung (2006).

El caso del cultivo del ostión del norte (*Argopecten purpuratus*) en Chile es un caso interesante de estudio por varias razones: (i) es una industria madura, de la cual se dispone bastante información biológica y tecnológica susceptible de ser empleada en modelamiento; (ii) en la práctica se hacen selecciones por tamaño; (iii) hay una fracción importante de producción de pequeña escala para la cual mejoras en el beneficio económico suelen ser importantes; (iv) la irrupción de Perú como un competidor por nichos de mercado similares, con mayores niveles de producción y menores costos, que ha significado un desplome en el precio internacional del producto (Molina *et al.*, 2012); (v) aumento en los costos de producción; y, (vi) aumento en las exigencias sanitarias (Aguila, 2009). Estas situaciones han repercutido en una menor participación en el mercado y una disminución en la

competitividad de la industria. Ante esto se requiere de una activa estrategia de innovación para mejorar la relación costo-beneficio. Lo anterior hace al cultivo del ostión del norte un objeto de estudio atractivo para evaluar el impacto económico de estrategias de cosecha alternativas, donde se pueda hacer la comparación de una cosecha total (situación control) con una estrategia de dos o más cosechas. Como se ha mencionado, algunos cultivadores de ostión no necesariamente sienten interés por buscar un óptimo económico, dado que es el cliente quien decide el calibre. Pero aún en esta circunstancia, es posible encontrar la solución óptima, dado que la restricción resuelve la variable del tamaño que cosecha, pero no la variable de tiempo de primera cosecha ni el intervalo de tiempo entre cosechas sucesivas. Molina *et al.* (2012) realizaron una simulación económica del cultivo del ostión del norte evaluando dos tamaños alternativos de cosecha (90 y 100 mm). De acuerdo a sus resultados el rendimiento financiero de la empresa mejora con mayores tamaños de cosecha, opuesto a lo encontrado por Gallardo (2010) para el abalón rojo.

Por otra parte, el cultivo de ostión del norte presenta restricciones legales para su cosecha desde bancos naturales. De acuerdo a la normativa vigente, el recurso está en veda y el tamaño mínimo legal de extracción es 90 mm de longitud (D.S. N°141/84). Sin embargo, esta normativa excluye a los centros de cultivo (J. Chávez, *com. pers.*), los que pueden cosechar los tamaños que requieran, siempre y cuando puedan acreditar su origen. Sin embargo, por alguna razón, los 90 mm siguen siendo como el límite inferior de tamaño a ser cosechado. De hecho, Molina *et al.* (2012) consideran este tamaño como talla mínima en su evaluación económica. Asumiendo este límite como la talla mínima a ser cosechada, si el cultivador decidiera cosechar a la edad a la cual el promedio de longitud es 90 mm podría cosechar sólo A-B (Fig. 1), lo que deja una cantidad importante de ind <90 mm en los sistemas de cultivo. Será necesario un intervalo de tiempo Δt para hacer una segunda cosecha y lograr extraer C-D. Eventualmente, nuevas cosechas podrían ocurrir hasta lograr cosechar todos los individuos sobrevivientes. En estos periodos Δt el aumento de tamaño y eventualmente de calibre, añadiría valor económico a la producción; mientras que la mortalidad natural y los costos de prolongar el cultivo en el tiempo reducen la rentabilidad de la cohorte. Así, el óptimo económico será resultado del tiempo de primera cosecha (DPC), de la talla de cosecha (LC), número de cosechas (NC) e intervalo de tiempo (Δt) entre cosechas sucesivas. Sin embargo, la gran cantidad de combinaciones de valores de DPC, LC, NC y Δt , en los hechos, resultan difíciles de evaluar en

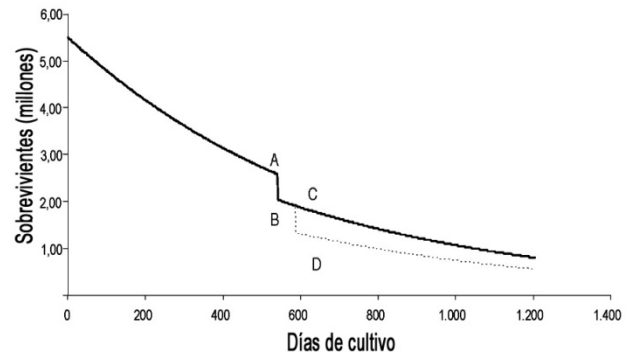


Figura 1. Supervivencia en una cohorte de ostión del norte cosechada a partir de los 18 meses de cultivo a una longitud de 90 mm. La línea gruesa representa la trayectoria dinámica para una sola cosecha (A, B), mientras que la línea punteada representa la trayectoria para una cohorte con dos cosechas (A, B y C D).

su totalidad, de ahí que en la práctica, las cosechas múltiples se hacen en base a prueba y error.

Para mostrar el efecto económico de una estrategia de cosechas parciales se utilizó el cultivo comercial del ostión del norte (*A. purpuratus*) como un estudio de caso con dos objetivos principales: (i) evaluar el rendimiento económico de una cohorte de ostión del norte, y (ii) mostrar el óptimo global, sin ninguna restricción de tiempo o tamaño, o un óptimo local, dada la existencia de un calibre en particular que es demandada por el mercado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó un modelo de simulación de tipo discreto que representa el cultivo de una cohorte del ostión del norte usando para ello planillas de cálculo Excel[®]. El modelo consta de tres módulos: un módulo biológico, que representa la supervivencia y la variabilidad en el crecimiento individual y la producción en calibres a través del tiempo; un submodelo tecnológico, que calcula los insumos productivos desde la fase de captación de semillas en ambiente natural, hasta la cosecha; y un submodelo económico integrado, el cual toma la información del submodelo biológico y del tecnológico, transformando la cosecha en calibres en ingresos totales y determinando la magnitud de los costos asociados, respectivamente. La información de insumos tecnológicos la convierte en costos totales operacionales, ya que el modelo no incorpora inversiones. Finalmente, calcula el valor actual neto operacional (VANO) de la cohorte bajo cultivo. Cada submodelo fue construido en hojas de cálculo separadas. La unidad de tiempo utilizada fue sobre una base diaria.

Submodelo biológico

La cohorte comienza con un número inicial de semillas, que se desarrollan hasta alcanzar el estado adulto. Durante este proceso los individuos están sometidos a procesos de mortalidad natural y crecimiento. Para estimar la supervivencia en el tiempo (N_t) se utilizó la ecuación (Hilborn & Walters, 1991).

$$N_t = N_{t-1} \cdot e^{-M_t \cdot \Delta t} \quad (1)$$

donde M_t es el coeficiente de mortalidad natural ($0,0014 \text{ día}^{-1}$, Araneda, 2000), el que eventualmente podría variar, dependiendo de la edad de los individuos. Se supuso un cultivo de 5 millones de juveniles captados en ambiente natural.

El crecimiento promedio en longitud ($L_{t,c}$) fue modelado usando la conocida ecuación de von Bertalanffy,

$$L_t = L_\infty \left(1 - \exp^{-K(t-t_0)}\right) \pm \varepsilon_t \quad (2)$$

donde L_∞ es la longitud máxima promedio; K es el parámetro de curvatura; t_0 es la edad a la cual la longitud fue cero, y ε_t es una variable aleatoria $[0, \text{var}]$ normalmente distribuida, que fue utilizada para incorporar la variabilidad individual en el crecimiento. Este aspecto es relevante al momento de establecer el calibre (medido como número de ind kg^{-1}) ya que es esta variabilidad la que permite hacer operativa las cosechas múltiples. De este modo individuos de una calidad deseable son extraídos del sistema y comercializados, mientras que los no deseables permanecen en cultivo hasta alcanzar los requerimientos del mercado. Esta aproximación difiere de la empleada por Molina *et al.* (2012) quienes modelaron el crecimiento asumiendo que una proporción fija de individuos (35%) estará bajo una cierta longitud (estado G), un enfoque similar al descrito por Zucker & Anderson (1999). En nuestra aproximación la cantidad de individuos bajo cierta talla estará dada por la longitud promedio a la edad y su respectiva desviación estándar. Aunque otros modelos de crecimiento pueden ser utilizados, se empleó el de von Bertalanffy ya que investigaciones anteriores han mostrado que es un modelo que describe adecuadamente el crecimiento de la especie (Thébault *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2012). Los valores de los parámetros fueron tomados de Ramos *et al.* (2012) y corresponden a 100 (L_∞), 0,09 (K) y 0 (t_0). Se utilizó un coeficiente de variación del 12% (Pérez, datos no publicados) para manejar la variabilidad individual en el crecimiento.

El calibre es el resultado del peso del músculo más el peso de la gónada de cada individuo. Los calibres fueron asignados de acuerdo al número de ind kg^{-1} , de

acuerdo a lo especificado en la Tabla 1. Esto implica modelar el crecimiento del músculo en función de la edad y la dinámica de la gónada, la cual depende, además, de eventos de maduración y desove. Así, un individuo adulto puede pertenecer al calibre A y al día siguiente, después de evacuados sus gametos, caer a un calibre B o C. La dinámica de músculo y gónada se realizó tomando los aportes de Ramos *et al.* (2012). Inicialmente se estableció una relación entre la longitud (ecuación 2) y el peso de las partes blandas (PPB, en gramos),

$$PPB_t = 2.675 \cdot \exp^{0.0313 \cdot L_t} \quad (3)$$

Posteriormente, ocupando las relaciones establecidas por Ramos *et al.* (2012) se relacionó el peso del músculo (PM, en gramos) con el PPB, a través de,

$$PM_t = -0.855 + (0.1395 \cdot PPB_t) \quad (4)$$

Se ha mencionado que en *A. purpuratus* (Martínez & Mettifofo, 1998) y en *Nodipecten (Lyropecten) subnodosus* (Racotta *et al.*, 2003) el músculo del ostión podría cumplir la función adicional de proveer energía para el proceso de gametogénesis, en cuyo caso podría presentar a través del tiempo, un ciclo similar al de la gónada. En este sentido, al inicio del proceso reproductivo el peso del músculo podría disminuir aunque el individuo aumente de longitud. No obstante, Villalejo-Fuerte *et al.* (2004) encontraron que la longitud de *N. subnodosus* explica un alto porcentaje de la varianza del peso del músculo aductor ($R^2 = 0,96$), lo cual le aportaría robustez al uso de las ecuaciones (3) y (4).

La variabilidad temporal en el peso de la gónada fue modelada a partir de los 50 mm de longitud de concha, utilizando la relación dada por Ramos *et al.* (2012):

$$PG_t = -1.4862 + 0.2204 \cdot PPB_t + \left(\text{seno} \left(\pi \cdot \frac{t - 2.1851}{120} \right) \right) \cdot (0.8554 - 0.0662) \quad (5)$$

Así, el peso individual en el tiempo fue la suma de PM_t más PG_t .

El calibre se asignó calculando cuántos individuos de peso (PM + PG) hacen un kilo. En la rutina de

Tabla 1. Valores de producto final (ind kg^{-1}) (músculo más gónada) y sus respectivos precios.

Calibre	Unidades por kg	Precio (US\$)
A	22-57	19,8
B	58-69	17,7
C	70-109	16,5
D	110-150	15,2
E	151-218	-
F	219-más	-

cosechas parciales del modelo, los individuos cosechados son eliminados del sistema. Los individuos remanentes siguen creciendo según la ecuación (2), de manera que la distribución normal original es truncada hacia la derecha. El modelo no asume factores de denso dependencia, de manera tal que la mortalidad natural y el crecimiento no son modificados por los cambios en el tamaño de la cohorte.

Submodelo tecnológico

Para describir el submodelo tecnológico se usó la descripción del sistema de cultivo dada por Araneda (2000). El sistema de cultivo del ostión del norte consiste en varias etapas que dependen del tamaño promedio del conjunto de los individuos. Los requerimientos asociados a cada etapa, que el modelo los reproduce a través de ecuaciones, se determinan a partir del plan de cultivo descrito en la Tabla 2.

El número de *pearl nets* requeridos para un cultivo de 5 millones de semillas se calculó dividiendo este número por la densidad de siembra en esta etapa de cultivo (Tabla 2); en tanto el número de *long lines* se obtuvo dividiendo el número de *pearl nets* por la cantidad de éstos por *long line* (Araneda, 2000).

Submodelo económico

Los ingresos totales se calcularon multiplicando la producción en calibres por su valor de mercado (Tabla 1). Para cada cosecha se determinó la distribución de individuos por cada calibre y la cantidad de kilos que representa cada calibre en distintos tiempos de cosechas ($k_{c,t}$). Así, el ingreso total generado por la cohorte fue calculado como

$$IT_t = \sum_{t=1}^n k_{c,t} \cdot p_c \quad (6)$$

donde p_c es el precio por calibre.

Los costos asociados al modelo son todos operacionales, no hay costos de inversión incorporados y se detallan en la Tabla 3.

Los costos de lavado de material (lav_t) están asociados al tiempo t donde ocurren los desdobles o cambios de densidad y de sistema de cultivo (Tabla 2). Este costo se asocia al gasto de operación de la máquina de lavado y al costo de la mano de obra utilizada por sistema de cultivo.

$$lav_t = \$_{oper} \cdot nll_t + \$_{mo} \cdot nll_t \quad (7)$$

donde $\$_{oper}$ es el costo de la máquina de lavado; $\$_{mo}$ es el costo de la mano de obra y nll es el número de *long lines*.

El modelo incorpora también costos por concepto de operarios eventuales (COE) para las labores de manejo dentro de la empresa. El pago corresponde al equivalente del salario diario por el período en días que dura cada etapa de desdoble (Araneda, 2000),

$$COE_t = \frac{N_t}{30,000} opev \quad (8)$$

donde $opev$ es el costo por hora de trabajo por operario.

Se estimó que, diariamente, un operario es capaz de manipular en faenas de siembra y desdoble treinta mil ostiones por día. La jornada laboral se estimó en 8 h.

Existe otro costo relativo al equipamiento en operaciones de desdoble y de siembra (CTDS_t).

$$CTDS_t = \frac{N_t}{30,000} \cdot CEO \quad (9)$$

Los costos por concepto de reparación de sistemas (CRS) fueron definidos a partir de la cantidad de sistemas (*long lines*) por el costo unitario de la reparación de cada uno de ellos y por el número de etapas de cultivo (Araneda, 2000). Incluye además costos fijos diarios (CFD) y un ítem de imprevistos (CI) (Araneda, 2000).

Existen dos costos adicionales, indexados a las cosechas. Uno de ellos es la mano de obra adicional y otros elementos asociados a la cosecha (combustibles, lubricantes, otros) el cual fue estimado, a partir de

Tabla 2. Descripción del plan de cultivo para el ostión del norte: tamaño al ingreso y egreso de cada etapa (mm) y caracterización de cada sistema de cultivo (número de pisos y densidad de ind piso⁻¹).

Etapas de manejo	Ingreso (mm)	Egreso (mm)	Tipo de sistema	Nº de pisos	Densidad (ind piso ⁻¹)
1	-	10	Bolsa colectora	10	-
2	10	25	Pearl net	10	150
3	25	40	Linterna 1	10	100
4	40	55	Linterna 2	10	70
5	55	>	Linterna 3	10	30

Tabla 3. Principales parámetros económicos asociados al modelo.

Parámetro	Concepto	Valor (US\$)	Unidades
p_c	Precio por calibre	Ver Tabla 1	
$\$oper$	Costo de operación de máquina lavadora	0,1	US\$ línea ⁻¹
$\$mo$	Costo de mano de obra en lavado de material	0,2	US\$ línea ⁻¹
$\$ll$	Costo del long line	729,2	US\$ long line ⁻¹
CDS _t	Costos de desdoble y siembra	4,2	US\$ h operario ⁻¹
opev	Costos por operarios eventuales	4,2	US\$h operario ⁻¹
MOC	Mano de obra en etapa de cosecha	4,2	US\$ h operario ⁻¹
Maq	Costo por maquila	4,0	US\$ k ⁻¹
CRS	Costos por reparaciones	1,0	US\$ línea ⁻¹
CEO	Costos de equipamiento de operarios	29,0	US\$ operario ⁻¹
CFD	Costo fijo diario	299,0	US\$ día ⁻¹
CI	Imprevistos	2.950,3	US\$ etapa

información no oficial de los centros de cultivo, en US\$ 15.000. El segundo costo asociado es la maquila, el que es de aproximadamente US\$4 por kg de producto final, asumiendo una empresa que externaliza este servicio.

Los costos a través del tiempo fueron calculados como,

$$CT_t = \sum_{i=0}^n VC_i + FC_t \quad (10)$$

donde VC_t es el costo variable y FC_t el fijo.

Finalmente, el resultado económico de la interacción conjunta de factores biológicos, tecnológicos y de estrategia de cosecha fue evaluado mediante la actualización de los valores futuros a valores presentes, dada una tasa de descuento i

$$VANO = \sum_{t=0}^n \frac{IT_t - CT_t}{(1+i)^t} \quad (11)$$

Este valor actual neto operacional excluye los costos de inversión y fue evaluado en un horizonte de tiempo que incluye el periodo de vida de una cohorte de cultivo, desde la etapa de semilla a la de cosecha. La tasa de descuento empleada fue del 12% anual (Araneda, 2000).

Aunque todos los valores fueron indexados en pesos chilenos, los resultados finales se presentan en dólares americanos, usando un tipo de cambio de \$480 por dólar.

Estrategias de cosecha

El modelo asume que los tamaños de los individuos de la cohorte siguen una distribución normal en torno a un valor promedio dado por la ecuación de crecimiento. En la estrategia de cosecha total, alcanzado un tamaño promedio, todos los individuos son removidos del

sistema. La cosecha total es separada entonces en calibres de acuerdo a la Tabla 1. En la estrategia de cosechas parciales la distribución normal original se va truncando en la medida que ocurren las cosechas VANO. Inicialmente es necesario definir el número de cosechas que se harán (NC), un día para la primera cosecha (DPC, 400, 450, 500, 550, 600, 650 y 700 días, contados a partir del día cero, cuando se siembran los juveniles en *pearl nets*), además de un tamaño de primera cosecha (LC). En el modelo se probaron las longitudes 90, 92, 95, y 97 mm. Así, todos los individuos de tamaño igual o mayor de la longitud definida como talla de primera cosecha son removidos del sistema. Complementariamente, se requiere definir el intervalo de tiempo entre dos cosechas sucesivas (Δt), evaluándose un Δt de 20, 40, 60 y 80 días. Así, el VANO será función de

$$VANO\{DPC, LC, \Delta t, NC\} \quad (12)$$

En cada cosecha la cantidad extraída es separada en calibres y vendida, generándose un ingreso cada vez que ocurre una cosecha. Incluyendo la estrategia de cosecha total se evaluaron 6 alternativas (de 1 a 6 cosechas). En el modelo las distintas combinaciones de DPC, LC, Δt y NC son ingresadas manualmente por el usuario a fin de generar los resultados económicos para cada combinación. Matemáticamente, el modelo estima en rigor el ingreso total a través del tiempo como

$$IT_t = \sum_{t=DPC+\Delta t}^n \sum_{NC=t-DPC}^n \sum_{LC}^A \sum_{c=F} k_{c,t} \cdot p_c \quad (13)$$

que es equivalente a la ecuación (12).

Finalmente, un escenario hipotético, con una talla mínima de extracción inferior a los 90 mm es evaluada, de forma de contrastarla con el VANO, obtenido de los escenarios anteriormente descritos.

Esta comparación tiene sentido para poder evaluar el resultado económico de las medidas de ordenamiento de esta actividad, considerando que está sometida a una norma de tamaño mínimo en una situación donde el cultivo puede ser completamente artificial desde la producción de la semilla en hatchery hasta su cosecha.

Presentación de los resultados

Los resultados son presentados mediante un gráfico radial (Fig. 2), donde cada eje representa una combinación de día de primera cosecha seguido del número de días entre cosechas sucesivas. Así, por ejemplo, la combinación (600, 80) representa una estrategia que fija como día de primera cosecha el día 600 de cultivo y en Δt de 80 días entre cosechas. Los círculos concéntricos representan los valores de VANO en miles, desde US\$-200 hasta US\$ 300.

RESULTADOS

Desempeño del modelo (corrida base 90 mm)

Se compararon, a modo de ejemplo, dos escenarios posibles de cosecha, que son una combinación de día de primera cosecha, longitud y días entre cosechas: (540, 90, 46) y (540, 90, 90). Se requieren de al menos seis cosechas para que todos los individuos puedan tener 90 mm o más (Fig. 3). Sin embargo, los resultados evidenciaron que el VANO es afectado por el número de cosechas realizadas y por el intervalo de tiempo entre éstas (Fig. 4). Hasta dos cosechas arroja-

ron valores negativos. Además, con un Δt de 46 días el máximo VANO ocurre con cinco cosechas (US\$ 167.000), mientras que con Δt de 90 el máximo VANO ocurre con cuatro cosechas (US\$ 138.000).

Dado los niveles en los costos de cultivo, cada cosecha parcial va recuperando parte del costo operacional (Fig. 5). Así, con una estrategia de primera cosecha a los 18 meses de cultivo, con un Δt de 46 días entre ellas y con una talla mínima de extracción de 90 mm, recién al cabo de la tercera cosecha los costos de cultivo de la cohorte serán recuperados, con un máximo en la quinta cosecha. Una sexta ya haría descender el valor del VANO (Fig. 5). Las abruptas caídas del VANO anteriores al día 400 son debidas a los costos asociados a los cambios de sistemas de cultivo. En términos de producción y comparando ambos escenarios (Fig. 6), la estrategia (540, 46, 90) genera menos kg de calibre A y más de B que la estrategia (540, 90, 90), pero aún así resulta en un VANO mayor (Fig. 4).

Efectos de las variables de control sobre el VANO

Las combinaciones de día de primera cosecha, días entre cosechas sucesivas y longitud tuvieron efecto sobre el VANO (Fig. 7). En general, tamaños de 95 y 97 mm con un tiempo de cultivo mayor rindieron beneficios económicos positivos, en contraste con tamaños de 90 y 92 mm se obtienen menores VANO. Entre los VANO positivos la estrategia (660-95-20) generó un VANO de US\$ 248.000, mientras que la

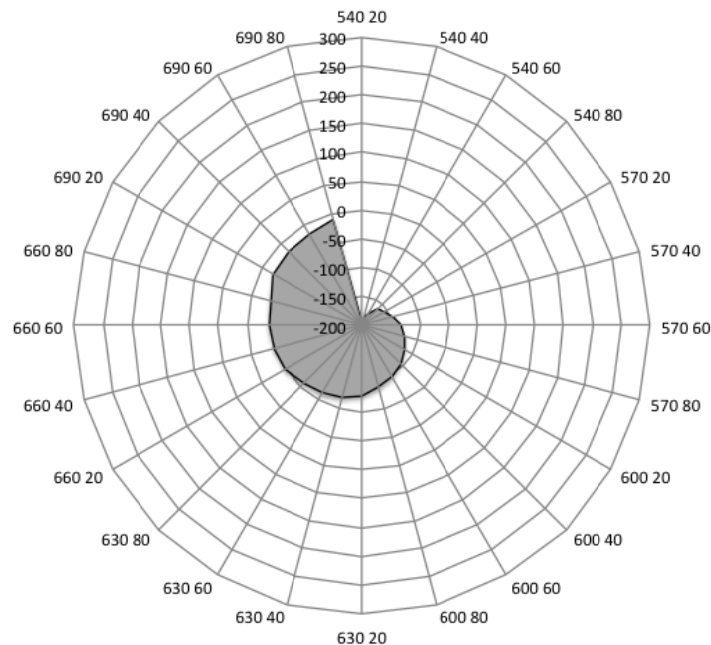


Figura 2. Representación gráfica de los resultados. Los ejes ortogonales representan la combinación de día primera cosecha y días entre cosechas sucesivas, mientras que los círculos concéntricos representan el VANO en miles de dólares.

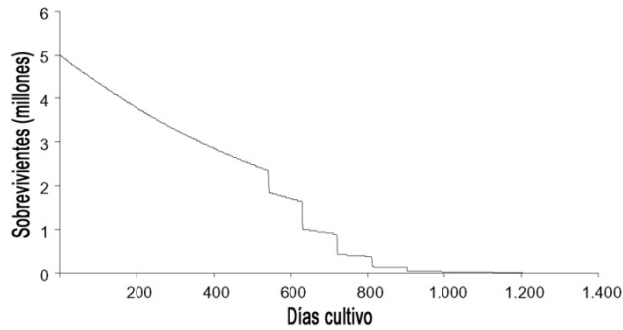


Figura 3. Sobrevivencia de una cohorte de ostión del norte y número de cosechas necesarias para colectar todos los individuos sobrevivientes de un tamaño igual o mayor a 90 mm.

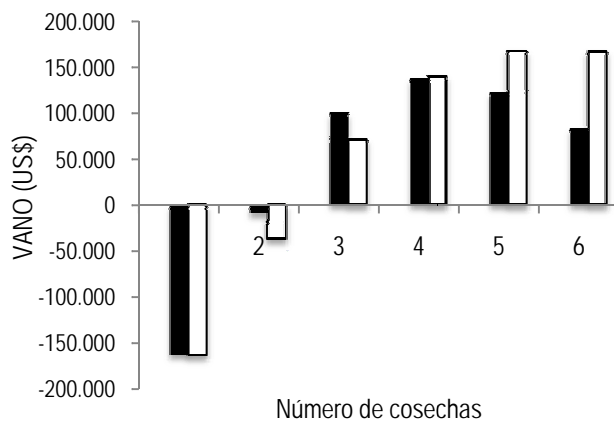


Figura 4. Variación en el nivel del VANO en función del número de cosechas para dos estrategias: (540, 90, 46) barras blancas y (540, 90, 90) barras negras.

estrategia (540-90-20) generó US\$ 137.000. Las diferencias son mayores al comparar la cantidad de cosechas parciales, días de cultivo a la primera cosecha, tamaño de cada individuo al tiempo de cosecha y días entre éstas (Fig. 7). Con sólo una cosecha todos los VANO son negativos; mientras más cosechas los resultados económicos tienden a mejorar (Fig. 7). Los resultados indicaron que el mayor VANO (US\$ 276 mil) se obtiene de una combinación de cosecha a partir del día 660 de cultivo, 20 días entre cada una de ellas, 95 mm de longitud valvar y un total de seis cosechas (Fig. 7f).

La estrategia que involucra un menor tamaño de cada individuo al tiempo de cosecha (540-85-30) y seis cosechas, mostró que el VANO obtenido sería comparable al generado en el mejor escenario con la estrategia (660, 95, 20). En efecto, al ser más temprana la cosecha, se obtiene una mayor producción de calibre B (Fig. 8) lo que permite generar un VANO de US\$ 279.000 (Fig. 9).

DISCUSIÓN

Los resultados indican que el rendimiento económico es afectado por la estrategia de cosecha seleccionada. Este tipo de resultado fue adelantado ya por Brummett (2002), USMSFP (2006) y Yu & Lueng (2006). Combinaciones alternativas de día de primera cosecha, longitud valvar, número de días entre cosechas sucesivas y número de cosechas generan distintos niveles de rendimientos económicos, aspecto que debiera ser considerado por los productores. En los escenarios simulados de cosechas, una decisión incorrecta en este sentido podría generar una diferencia del orden de US\$ 510.000. Hay que considerar, eso sí, que en el modelo sólo se incorporaron los costos de operación, sin incluir inversiones, salarios de personal administrativo, seguros y otros costos fijos. Esto fue así ya que el principal objetivo de este trabajo fue mostrar los cambios en los rendimientos financieros de una empresa al implementar distintas estrategias de cosecha. Una vez mostrado que el efecto es importante, se debiera modelar el cultivo en forma integral, en la línea mostrada por Molina *et al.* (2012), esto es, incorporando todos los costos y modelando el comportamiento de múltiples *batch* de cultivos. Una empresa funcionando a plenitud genera un *batch* mensual de ostión del norte por lo que en el ciclo de cultivo pudieran existir alrededor de 18 *batch* creciendo simultáneamente.

Los resultados obtenidos pueden ser analizados buscando (a) el VANO máximo que se genera entre todas las combinaciones analizadas, o (b) una zona que aunque no contenga el máximo VANO si posee un valor que maximiza el VANO dadas ciertas restricciones. En este caso, el día de primera cosecha, la cantidad de días entre cosechas, longitud y número de cosechas constituyen las variables de control, en tanto que el VANO es el resultado. Así, de todas las alternativas analizadas el mejor resultado (situación (a)) corresponde a la combinación 660, 20, 95 con seis cosechas, que genera un VANO de US\$ 276.000. En el caso (b), éste implica el máximo valor del VANO dentro de un área con algún tipo de restricción externa (calibre o tiempo de puesta del producto en el mercado). A modo de ejemplo para la longitud 90 mm de cosecha la mejor opción es la combinación 600, 40, 90 y cinco cosechas ya que produce un VANO de US\$ 183.000, que no es el mejor resultado, pero dada la restricción de tamaño es la que maximiza el VANO. En caso que la restricción sea una cuestión de tiempo los resultados pueden ser interpretados, a modo de ejemplo, de la siguiente manera. Supóngase que el producto solicitado debe ser puesto en el mercado a

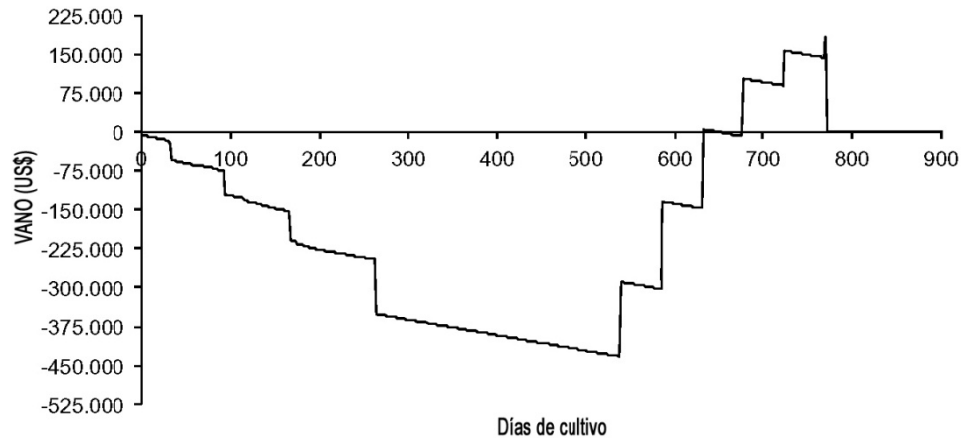


Figura 5. Dinámica del VANOS a través del tiempo para una estrategia basada en seis cosechas (540, 90, 46).

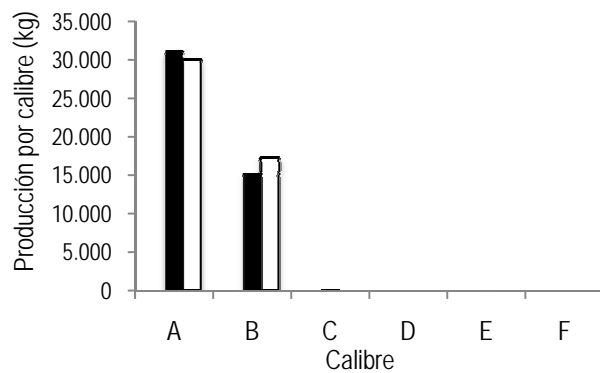


Figura 6. Producción en kilos de ostión del norte por calibre comparando las estrategias descritas en el texto y la Figura 4: (540, 90, 46) barras blancas y (540, 90, 90) barras negras.

partir del día 630 y tener una longitud de 92 mm, entonces la mejor combinación sería 630, 80, 92 con seis cosechas, las que producen un VANOS de US\$ 182.000. Este tipo de restricciones son usuales para empresas de cultivo, donde muchas veces no tienen capacidad de instalar en el mercado sus propios productos finales, sino que son tomadores de las opciones que el cliente demanda. Un análisis más detallado permite también visualizar dónde el negocio productivo no es atractivo o simplemente inviable.

Como ha sido mencionado en la Introducción, la situación del cultivo del ostión del norte (*A. purpuratus*) en Chile pasa por un momento delicado (Aguila, 2009) que requiere de una activa estrategia de innovación para mejorar la relación costo-beneficio. Dado que es difícil que un cambio de este estilo venga por el lado tecnológico (cambios en la tecnología de cultivo, la que no ha cambiado sustantivamente en más de 25 años (Avendaño & Cantillán, 2008)) o

éste puede ser lento y costoso por medio del mejoramiento biológico (programas de mejoramiento genético), el análisis de la estrategia de cosecha puede resultar una técnica de bajo costo y alto impacto. Por ejemplo, si las condiciones de cosecha se cambiaran a una estrategia de (540, 87, 30) con seis cosechas el VANOS subiría a US\$ 302.000. Esto implica un resultado más alto que la mejor alternativa con valores de longitud de cosecha superiores a 90 mm de longitud valvar. Este resultado difiere del obtenido por Molina *et al.* (2012), quienes reportaron mejores rendimientos económicos a tamaños de 100 mm, aunque dichos autores no evaluaron tamaños intermedios entre 90 y 100 mm ni tampoco inferiores a 90 mm de longitud valvar. De hecho, los resultados de este trabajo indican que el VANOS obtenido cosechando individuos mayores o iguales a 97 mm de longitud es US\$ 33.000 menos que el máximo global señalado anteriormente. Si no se hubiese evaluado tallas intermedias, el VANOS obtenido cosechando a los 97 mm habría sido el más alto (US\$ 162.000 cosechando a los 90 mm *versus* US\$ 243.000 al hacerlo a los 97 mm). Por otra parte, esta diferencia puede ser originada por la forma en que modela la disponibilidad de distintos calibres en el tiempo, así como los parámetros que son insumos del modelo.

Así, el mejoramiento competitivo para esta industria en Chile requiere, entre otras medidas, de una revisión de la estrategia de cosecha por parte de las empresas y, por otra parte, de una mayor rigurosidad en la certificación de que los individuos cosechados provienen efectivamente de cultivo artificial y no de banco naturales, ya que los resultados mostrados sugieren que cosechando tamaños menores a 90 mm el beneficio económico podría aumentar o ser similar a otros escenarios con tamaños mayores de

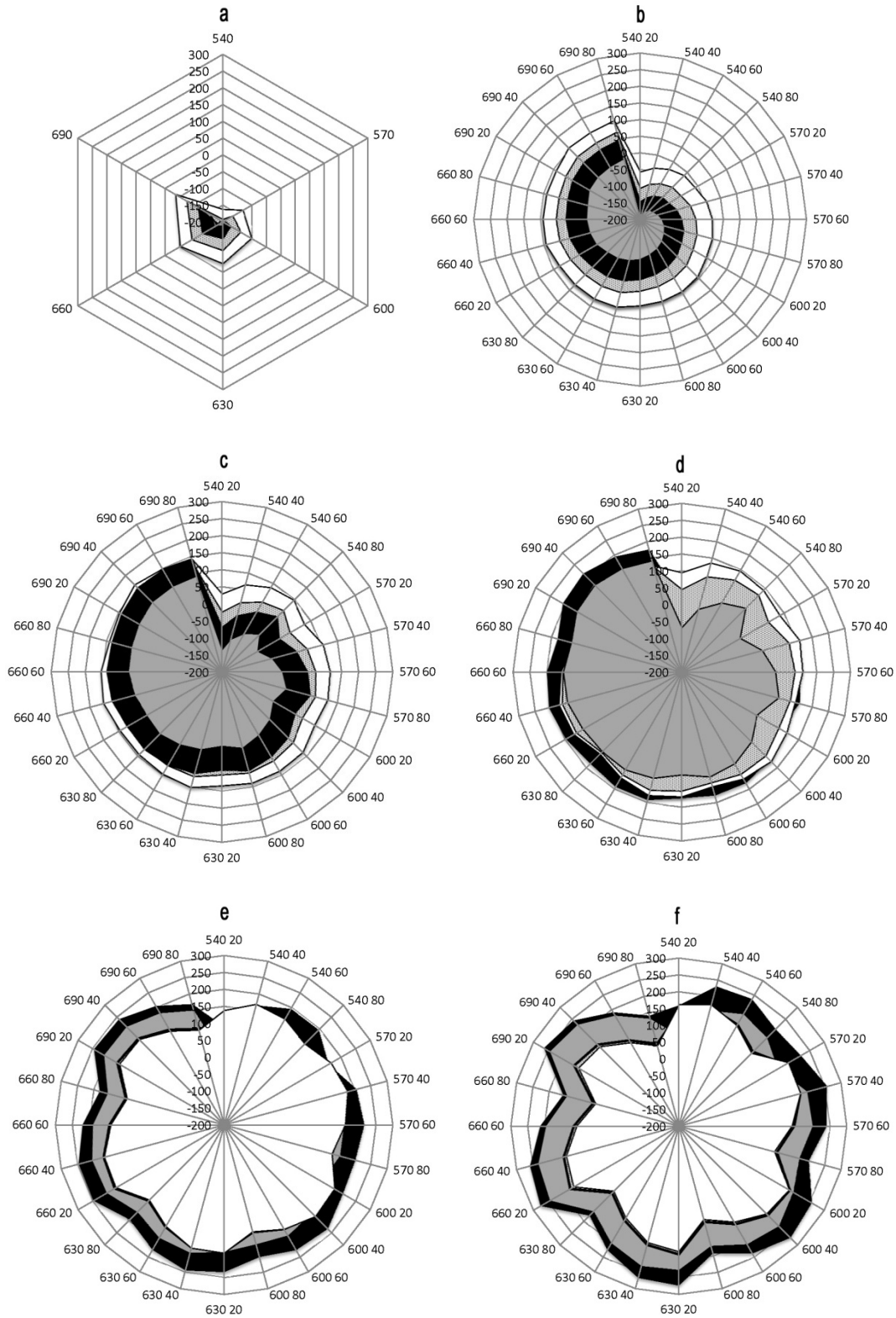


Figura 7. Diagramas radiales mostrando los resultados con sólo una cosecha a) 1 cosecha, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5 y f) 6. Los colores representan los tamaños de cosecha: blanco (90 mm), blanco con puntos negros (92 mm), gris (95 mm) y negro (97 mm).

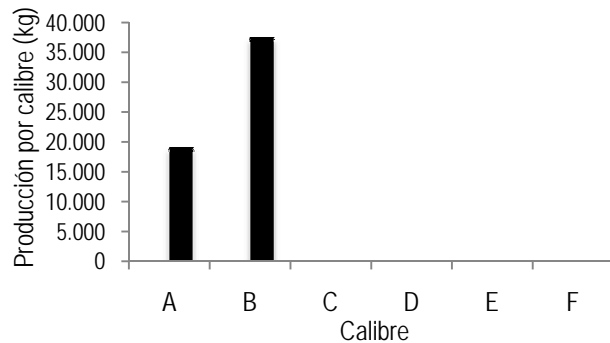


Figura 8. Producción de calibres de ostión del norte con una estrategia de cosecha (540, 85, 30).

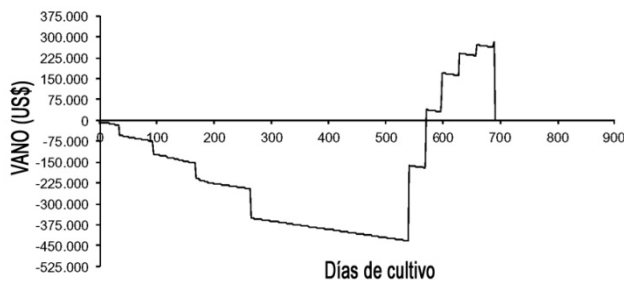


Figura 9. Dinámica del VANOS con la estrategia (540, 85, 30).

cosecha. Esto ocurre a pesar que los calibres cosechados sean de menor calidad y menor precio, debido al efecto de volumen (son más numerosos que individuos de mejores calibres, de mayor precio, pero menos abundantes), lo que hace que la relación costo-beneficio sea mayor. Finalmente, el tiempo total de cultivo para un *batch* puede reducirse, implicando un ahorro en los costos de operación.

Por otra parte, (i) la toma de decisiones de cosecha al interior de una empresa de cultivo se ve dificultada, entre otras razones, por la gran cantidad de combinaciones posibles que hacen inviable el análisis basado únicamente en la experiencia (Molina *et al.*, 2012). En este sentido, herramientas cuantitativas como las descritas en este trabajo y en el de Molina *et al.* (2012) pueden constituir una opción aplicable al diseño y a la gestión interna de la empresa; (ii) es de vital importancia considerar la variación esperada en los resultados económicos producto de cambios en el patrón de crecimiento. Recientemente, Pérez *et al.* (2012) mostraron que en una misma localidad pueden existir variaciones interanuales, incluso estacionales, en los parámetros de crecimiento para esta especie.

Finalmente, una serie de preguntas de investigación debieran ser exploradas a futuro. (a) dado que en este análisis se consideró como constante para todas las etapas de cultivo, y edades qué efectos tienen

en las variables financieras cambios en la mortalidad natural en distintas etapas del cultivo, (b) en la medida que las cosechas operan ¿hay cambios en el patrón de sobrevivencia y/o crecimiento dada la mayor disponibilidad de recursos (espacio y alimento) en las líneas de cultivo? y ¿cómo ésta, de ocurrir, afecta los resultados obtenidos?, (c) ¿cuál es el efecto financiero derivado de cambios en el patrón de crecimiento y cómo predecir a futuro dichos cambios? Pérez *et al.* (2012) mostraron que existe variación intra e interanual en el crecimiento. Dado que el crecimiento y disponibilidad de calibres es el corazón de la función de producción se debiera esperar cambios en los resultados económicos obtenidos de cada cohorte, (d) ¿cómo afecta la estocasticidad en el sistema al comportamiento financiero y a las estrategias óptimas de cosecha? y (e) ¿cuál sería el comportamiento de largo plazo del sistema considerando un horizonte de tiempo de producción con múltiples cohortes cultivadas en el tiempo? Todas estas preguntas no tienen una respuesta en tiempo actual, pero podrían ser sometidas a evaluación en la medida que se perfecciona el modelo.

REFERENCIAS

- Aguila, M.P. 2009. Un sector en riesgo. [http://www.aqua.cl/especiales/articulos/?id=33]. Revisado: 27 noviembre 2012.
- Araneda, M. 2000. Modelación bioeconómica para el cultivo comercial del recurso ostión del norte *Argopecten purpuratus* (Lamarck, 1819) en sistemas suspendidos. Memoria de Ingeniero en Acuicultura, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, 64 pp.
- Araneda, M., E.P. Pérez & E. Gasca-Leiva. 2008. White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three densities: condition state based on length and weight. *Aquaculture*, 283: 13-18.
- Avendaño, M. & M. Cantillán. 2008. Aspectos biológicos y poblacionales de *Argopecten purpuratus* en la reserva marina La Rinconada: contribución para su manejo. *FAO, Actas de Pesca y Acuicultura*, 12: 249-266
- Brummett, R. 2002. Comparison of African tilapia partial harvesting systems. *Aquaculture*, 214: 103-114.
- De Ionno, P.N., G.L. Wines, P.L. Jones & R.O. Collins. 2006. A bioeconomic evaluation of a commercial scale recirculating finfish growout system. An Australian perspective. *Aquaculture*, 259: 315-327.
- Gallardo, I. 2010. Análisis bioeconómico de la estrategia de cosechas parciales y total: el cultivo del abalón rojo *Haliotis rufescens* (Swainson, 1822) como un

- estudio de caso. Memoria de Ingeniero en Acuicultura, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, 55 pp.
- Hannesson, R. 1989. Optimal thinning of a year-class with density-dependent growth. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43: 889-892.
- Hilborn, R. & C. Walters. 1991. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. Chapman & Hall, New York, 570 pp.
- Lyashenko, O. 2001. A stochastic (adaptive) problem of optimal harvesting. *J. Math. Sci.*, 107: 65-70.
- Martinez, G. & L. Mettifogo. 1998. Mobilization of energy from adductor muscle for gametogenesis of the scallop *Argopecten purpuratus* Lamarck. *J. Shellfish Res.*, 17: 113-116.
- Molina, R., R. Cerda, E. González & F. Hurtado. 2012. Simulation model of the scallop (*Argopecten purpuratus*) farming in Northern Chile: some applications in the decision making process. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 40(3): 679-693.
- Ngoc, N.T., N. Van Hoa, G. Van Stappen & P. Sorgeloos. 2010. Effect of partial harvesting strategies on *Artemia* biomass production in Vietnamese salt works. *Aquacult. Res.*, 41: 289-298.
- Pérez, E.P., C. Azócar, A. Araya, O. Astudillo & M. Ramos. 2012. Comparación del crecimiento de *Argopecten purpuratus* entre cohortes obtenidas de captación de larvas en ambiente natural y de hatchery. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 40(4): 1026-1038.
- Racotta, I.S., J.L. Ramirez, A.M. Ibarra, M.C. Rodríguez-Jaramillo, D. Carreño & E. Palacios. 2003. Growth and gametogenesis in the lion-paw scallop *Nodipecten (Lyropecten) subnodosus*. *Aquaculture*, 217: 335-349.
- Ramos, M., E. Pérez, B. Yannicelli, P. Muñoz, A. Mujica, J. Sellanes, J. Moraga, O. Astudillo, A. Sepúlveda, E. Ovalle, D. Figueroa & O. Pizarro. 2012. Sistema de monitoreo y pronóstico de las condiciones oceanográficas para la gestión productiva y pública del océano costero: fase I. Informe Final Proyecto INNOVA 07CN13 IXM-150: 332 pp.
- Saiti, F., D.M. Jamu, B. Chisala & P. Kambewa. 2007. Simulation of optimal harvesting strategies for small-scale mixed-sex tilapia *Oreochromis shiranus* (Boulenger, 1896). Ponds using a bio-economic model. *Aquacult. Res.*, 38: 340-350.
- Tian, X., P.S. Leung & D.J. Lee. 2005. Size economies and optimal scheduling in shrimp production: results from a computer simulation model. *Aquacult. Ing.*, 22: 289-307.
- Thébault, J., G. Thouzeau, L. Chauvaud, M. Cantillán & M. Avendaño. 2008. Growth of *Argopecten purpuratus* (Mollusca: Bivalvia) on a natural bank in Northern Chile: sclerochronological record and environmental controls. *Aquat. Living Res.*, 21: 45-55.
- US Marine Shrimp Farming Program (USMSFP). 2006. Partial harvest economics: more shrimp, more profits. *Industry Briefs*, 12: 1-6.
- Villalejo-Fuerte, M., M. Arellano-Martínez, M. Robles-Mungaray & B. Ceballos-Vásquez. 2004. Notes on the growth, survival, and reproduction of the lion's paw scallop *Nodipecten subnodosus* in a suspended culture. *Hidrobiológica*, 14: 161-165.
- Villalón, J.R. 1991. Practical manual for semi-intensive commercial production of marine shrimp. Texas A&M University Sea Grant College Program, TAMU-SG-91-501: 103 pp.
- Wurts, W. 2004. Harvesting fish ponds. *World Aquacult.*, 23: 56-57.
- Yu, R. & P. Leung. 2005. Optimal harvesting strategies for a multi-cycle and multi-pond shrimp operation: a practical network model. *Math. Comp. Simul.*, 68: 339-354.
- Yu, R. & P. Leung 2006. Optimal partial harvesting schedule for aquaculture operations. *Mar. Res. Econ.*, 21: 301-315.
- Yu, R., P. Leung & P. Bienfang. 2006. Optimal production schedule in commercial shrimp culture. *Aquaculture*, 254: 426-441.
- Yu, R., P. Leung & P. Bienfang. 2007. Modeling partial harvesting in intensive shrimp culture: a network-flow approach. *J. Oper. Res.*, 193(1): 262-271.
- Zucker, D. & J. Anderson. 1999. A dynamic, stochastic model of a land-based summer flounder (*Paralichthys dentatus*) aquaculture firm. *J. World Aquacult. Soc.*, 30: 219-235.

Received: 23 January 2013; Accepted: 8 January 2014